

## 論文の内容の要旨

論文題目 An fMRI Investigation of Functional Specialization in the Left Prefrontal Cortex for Sentence Comprehension

(左前頭前野における文理解に特化した領域の fMRI 研究)

氏名 橋本 龍一郎

人間の言語能力において、文法知識は極めて重要な要素である。文法規則を適用し、文の意味を理解する過程は文法処理とよばれるが、その過程には言語性短期記憶が大きく関与している。文法処理から言語性短期記憶を分離することが困難であるため、文法処理に固有のシステムが存在するのか（モジュール仮説）、あるいは領域一般的な言語性短期記憶システムが文法処理をおこなうのか（非モジュール仮説）という問題が現在にいたるまで議論されてきた。近年の機能イメージング研究により、左下前頭回 (left inferior frontal gyrus, 以下 L. IFG) と左前頭前野背側部 (left dorsolateral prefrontal cortex, 以下 L.DLPFC)、および左前頭前野背部 (left dorsal prefrontal cortex, 以下 L.DPFC) が文法処理に特化した領域の候補として挙げられているが、これらの領域は、いずれも文法処理が直接要求されない単語の記憶課題においても賦活されること、および、その活動は記憶課題の難度によって強まることが報告されている。これらの領域の中でも特に、L.DPFC/L.DLPFC は、単語のアイテム記憶よりも、順序記憶に選択的に関係していることがイメージング研究、および神経心理学的研究によって示されている。

これらの結果は、文法処理の非モジュール仮説を強く支持する結果として解釈されている。

一方、言語学では、言語性短期記憶など一般的な認知機能とは異なる、文法処理に固有の性質がいくつか存在することが示されている。その代表として、「文法規則の構造依存性」が挙げられる。例えば、「太郎は三郎が彼をほめると思った」という文においては、「三郎が彼をほめる」と、「太郎が～と思った」という二つの節の間には階層的な関係が存在し、前者の節が後者の節に埋め込まれる構造をとっている。文法規則の適用は、このような階層性をもつ文法構造に依存しており、単語間の線形順序では、文法規則を記述できないことが示されている。そして、この構造依存的な性質は、英語・日本語といった個別言語の違いによらず、自然言語に普遍的に観察されることも明らかにされている。また、主に行動データや事象関連電位の研究から、通常の間文処理においては、単語が継時的に新しく入力されるごとに、自動的に文法情報が処理されることが示されている。この性質は、意識的な努力や注意を強く要求する、一般的な言語性短期記憶課題と対照的である。この研究は、文法処理の性質の中でも、特に構造依存性と自動性に焦点をあて、文法処理と言語性短期記憶を解離する実験課題を作成した。

本研究では、文法処理に含まれる言語性短期記憶の要素を排除するために、文法判断 (syntactic judgment, 以下 SYN) 課題と言語性短期記憶 (short-term memory, 以下 STM) 課題を設定した。SYN 課題では、固有名詞 (人物名) 2つ、動詞 2つ、および代名詞 1つを含む中央埋めこみ文 (例: 「太郎は三郎が彼をほめると思った」) を視覚的に提示し、課題条件に従って文中の単語 1つに下線を付した。SYN 課題として 2条件を設定し、(1) 下線部の動詞の主語が文中のどの人物に対応するか (SYN-1)、(2) 下線部の代名詞が文中のどの人物を示し得るか (SYN-2) を判断させた。これらの課題では、明示的に文法判断が求められるため、文法処理をつよく必要とした。一方、STM 課題では、SYN 課題で用いた文をそのまま記憶する課題 (STM for sentence, 以下 STM-S) と、同じ文の単語をランダムに並び換えた単語列を、語順を保持したまま記憶する課題 (STM for words, 以下 STM-W) の 2種類を用意した。STM 課題においては、提示された単語 (“what”) だけでなく、その順番 (“when”) を記憶することが求められた。STM-S、STM-W ともに課題内容は同じであるが、STM-S は単語が文法的に正しい順序で提示されるため、課題内容に依存せず自動的に機能する文法処理が含まれている。また、先行研究により、文中の語順をランダムに並び換えた単語列の記憶は、文法規則に従った文の記憶・理解と比較して、著しく困難であることが示されている。従って、STM-W は 4 課題中もっとも短期記憶の負荷が強く、難度が高いことが予想された。これらの課題遂行中の被験者の脳活動を機能的磁気共鳴映像法 (functional

magnetic resonance imaging, 以下 fMRI) を用いて測定することにより、文法処理に特化した神経的基盤が存在するかを検討した。

被験者は 16 名の日本語を母国語とする男性 (年齢: 18–37 歳) で、うち 15 名は右利き、1 名は両利きであった。1.5 テスラの日立製 MRI (STRATIS II) を使用し、Echo-planar 法により機能画像の撮影をおこなった。繰り返し時間は 3 秒、空間解像度は  $3 \times 3 \times 6 \text{mm}^3$  で、前交連・後交連ラインから  $-24 \sim +66 \text{mm}$  の範囲を撮像した。データ解析には SPM99 を使用し、統計処理をおこなった。

行動データ解析により、STM-W は、他の 3 課題と比較して有意に正答率が低く、かつ反応時間が長いことが示された。この結果は、STM-W が最も難度の高い課題であるという予想を裏付けるものであった。

最初に、STM-S と STM-W の間で脳活動を比較した。両課題とも、提示された単語列の what・when を記憶する点においては同じであるが、STM-S は単語が文法規則に従って配列されているため、自動的な文法処理を伴うのに対し、STM-W は最も難度が高く、短期記憶をはじめとする一般的な認知的負荷が強い課題である。検定の結果、L.DPFC において STM-S に有意に強い反応が観察されたのに対し、左運動前野下部、左頭頂葉弁蓋部、および右帯状回前部は STM-W に選択的な反応を示した。この結果は、言語性短期記憶や一般的な認知的負荷には還元できない、文処理に固有のシステムが、左前頭前野に局在していることを示唆する。一方、左運動前野下部と左頭頂葉弁蓋部は、これまでに言語性短期記憶システムのなかでも、とくに内言(subvocal-rehearsal)に関係することが報告されている。従って、今回観察された STM-W に選択的な活動は、STM-W が要求する言語性短期記憶の負荷の強さを反映していると考えられる。

次に、2 つの SYN 課題 (SYN-1 + SYN-2) と STM-W の比較をおこなった。SYN 課題は、文の解釈が明示的に求められるため、STM-S 課題よりも文法処理の負荷が強い課題である。その結果、STM-S と STM-W の比較により同定された L.DPFC に加えて、L.IFG において、SYN 課題に選択的な活動が観察された。この結果は、文法処理と意味処理の対比、および文法的に複雑な文と単純な文を比較によって、L.IFG の一部が文法処理に選択的に関係していることを示した過去のイメージング研究の結果と一致する。一方、両側舌状回と右半球楔部は STM-W に選択的な活動を示した。

次に、SYN 課題 (SYN-1 + SYN-2) と STM-S の比較をおこなった。その結果、L.IFG と L.DPFC において、先の比較と同様に SYN 課題に強い反応がみられた。この活動は、SYN 課題と STM-S 課題が要求する文法処理の負荷の差を反映していると考えられる。逆に、両側舌状回、および右頭頂葉後部は STM-S に選択的な活動を示した。

最後に、L. DPFC と L. IFG の各領域において、STM-S をベースラインとした STM-W, SYN-1, SYN-2 課題の信号変化量をそれぞれ計算した。その結果、SYN-1, SYN-2 では2つの領域の間で有意な差は観察されなかったが、STM-W に対しては、L. DPFC において L. IFG よりも有意に大きい信号変化を観察した。この結果は、L. DPFC が L. IFG と比較して、STM-S に含まれる自動的な文法処理に強く関係していることを示しており、左前頭前野における2つの領域の間に機能分化が存在する可能性を示唆している。

本研究では、文法処理課題と言語性短期記憶課題を直接比較することにより、左前頭前野において、文法処理に特化した領域を同定することができた。この結果は、言語能力のモジュール性仮説を支持する、脳機能イメージングからの初めての証拠である。言語理論においては、文法知識のなかに、いくつかの内部モジュールが仮定されている。従って、本研究の成果は、これらのサブモジュールが各々どのように機能するかを解明するための基礎を与える。